

*А. В. ДЕМИРСКИЙ***РЕКОНСТРУКЦИЯ СЕТИ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛИЗИНА**

Пластинчатые теплообменные аппараты относятся к вспомогательному оборудованию технологического процесса производства лизина, в том числе используются в качестве рекуперативных устройств, позволяющих экономить внешние теплоносители процесса. Использование пластинчатых подогревателей, в приложениях химической технологии и пищевой промышленности является достаточно традиционным решением многих тепловых технологических процессов различных производств. В работе обоснована целесообразность модернизации пластинчатых рекуперативных теплообменников подогрева-охлаждения глюкозы в технологической схеме производства лизина. Показана некорректность расчетов теплообменных аппаратов в исходном проекте, которая выражается, прежде всего, в крайне низком значении величины касательного напряжения на стенке теплопередающих пластин, что приводит к интенсивному загрязнению их поверхности в процессе работы. Приведен расчет новых теплообменных аппаратов с учетом выявленных в процессе мониторинга работы недостатков. Также для обеспечения качественной работы с очисткой поверхности были модернизирована установка безразборной химической промывки (CIP-мойка). Для этого ее производительность (расход) 15 м<sup>3</sup>/ч была увеличена до 40 м<sup>3</sup>/ч. Увеличение мощности промывки дало немедленный положительный эффект за счет высокой турбулентности течения моющего раствора. Это позволило сделать вывод о том, что для таких продуктов необходимо рассчитывать производительность работы установки CIP-мойки в 2–2,5 раза больше, чем фактическая по самому продукту, так как фактически моющий раствор по консистенции это вода, которая дает при промывке более низкое значение касательного напряжения на стенке пластины. Проект модернизации получил практическую реализацию, которая показала корректность произведенных расчетов и практическую ценность произведенной реконструкции.

**Ключевые слова:** пластинчатые теплообменники, анализ теплопередачи, реконструкция теплообменных аппаратов, сопротивление загрязнению.

*О. В. ДЕМИРСЬКИЙ***РЕКОНСТРУКЦІЯ МЕРЕЖИ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ СХЕМІ ВИРОБНИЦТВА ЛІЗИНУ**

Пластинчаті теплообмінні апарати відносяться до допоміжного обладнання технологічного процесу виробництва лізину, в тому разі використовуються в якості рекуперативних пристроїв, що дозволяють економити зовнішні теплоносії процесу. Використання пластинчастих підігрівачів, в додатках хімічної технології та харчової промисловості є досить традиційним рішенням багатьох теплових технологічних процесів різних виробництв. У роботі обґрунтовано доцільність модернізації пластинчастих рекуперативних теплообмінників підігріву-охолодження глюкози в технологічній схемі виробництва лізину. Показана некоректність розрахунків теплообмінних апаратів в вихідному проекті, яка виражається, перш за все, в украй низькому значенні величини дотичного напруження на стінці пластин, що призводить до інтенсивного забруднення їх поверхні в процесі роботи. Наведено розрахунок нових теплообмінних апаратів з урахуванням виявлених в процесі моніторингу роботи недоліків. Також для забезпечення якісної роботи з очищенням поверхні були модернізована установка безрозбірної хімічної промивки (CIP-мийка). Для цього її продуктивність (витрата) 15 м<sup>3</sup>/год. була збільшена до 40 м<sup>3</sup>/год. Збільшення потужності промивання дало негайний позитивний ефект за рахунок високої турбулентності течії мийного розчину. Це дозволило зробити висновок про те, що для таких продуктів необхідно розраховувати продуктивність роботи установки CIP-мийки в 2–2,5 рази більше, ніж фактична по самому продукту, так як фактично мийний розчин по консистенції це вода, яка дає при промиванні більш низьке значення дотичного напруження на стінці пластины. Проект модернізації отримав практичну реалізацію, яка показала коректність проведених розрахунків і практичну цінність виробленої реконструкції. Встановлені апарати відпрацювали понад місяць без зупинки і розбирання на чистку. Кількість CIP-мийок скоротилося вдвічі і при цьому покращилась якість промивок.

**Ключові слова:** пластинчасті теплообмінники, аналіз теплопередачі, реконструкція теплообмінних апаратів, опір забрудненню.

*A. DEMIRSKYY***RECONSTRUCTION OF THE NETWORK OF RECUPERATIVE HEAT EXCHANGERS IN THE TECHNOLOGICAL SCHEME OF LYSIN PRODUCTION**

Plate heat exchangers are related to auxiliary equipment of the technological process the lysine production, including those used as recuperative devices that save external heat transfer fluids. The use of plate heaters in applications of chemical technology and the food industry is a fairly traditional solution to many thermal technological processes of various industries. The expediency of modernization the plate recuperative heat exchangers for preheating-cooling of glucose in the technological scheme of lysine production are grounded. The incorrectness of calculations of heat exchangers in the original project, which is expressed primarily in the extremely low value of the tangential stress on the wall of the heat transfer plates, which leads to intensive fouling of their surface during operation. Taking into account the deficiencies identified during the monitoring process the calculation of new heat exchangers was produced. Also, for the maintenance of high-quality work with surface cleaning, the installation of a detergent chemical wash (CIP-sink) has been modernized. For this purpose, its productivity (consumption) is 15 m<sup>3</sup>/h. was increased to 40 m<sup>3</sup>/h. Increasing the washing capacity gave an immediate positive effect due to the high turbulence of the flow of detergent solution. This made it possible to conclude that for such products it is necessary to calculate the productivity of the CIP-sink installation in 2–2.5 times more than the actual product itself, since the actual solution for cleaning the consistency is water that gives a lower washing value the value of the tangential stress on the plate wall. The modernization project received practical implementation, which showed the correctness of the calculations and the practical value of the reconstruction carried out. Installed units worked for more than a month without stopping and disassembling to clean. The number of CIP sinks has been halved and the quality of the rinses has improved.

**Keywords:** plate heat exchangers, heat transfer analysis, heat exchange unit's reconstruction, resistance to fouling

**Введение.** Лизин относится к незаменимым аминокислотам, которые не синтезируются организмами людей или животными. Это важный ингредиент для роста и питания, и поэтому он включается в корма или биологические добавки.

Лизин незаменимая аминокислота жизненно важна для построения критических белков организма. Он входит в триаду аминокислот, особо учитываемых при определении общей полноценности питания (лизин, триптофан, метионин). Недостаток лизина в зер-

© О.В. Демірський, 2018

новых продуктах и сравнительно высокая потребность организма в нем ставят проблему лизина на одно из первых мест. Данная аминокислота необходима для роста, восстановления тканей, производства антител, гормонов и ферментов.

Лизин один из главных компонентов, обеспечивающий сбалансированную диету различных животных. Он широко используется в качестве кормовой добавки для домашней птицы, свиней и другого скота, а также в фармацевтических препаратах, пищевых добавках и косметических средствах. Таким образом, лизин представляет собой биотехнологический продукт, имеющий важнейшее экономическое значение. Мировое производство в последнее время оценивается в более чем 2 миллиона тонн в год. Биологически большинство известных промышленных бактерий могут синтезировать лизин (L-лизин), а промышленное производство L-лизина почти полностью происходит путем микробной ферментации.

Таким образом, исследования направленные на совершенствование технологии производства лизина, снижение производственных затрат на выпуск продукции за счет внедрения энергосберегающих мероприятий являются актуальными и имеют высокую практическую ценность.

**Постановка проблемы и ее современное состояние. Анализ литературных источников.** В настоящее время разработано несколько типовых технологических схем промышленного производства лизина, которые продолжают совершенствоваться также и за счет модернизации аппаратного решения технологии. Фундаментальный обзор биотехнологии получения лизина можно найти в работе [1].

Реализация технологического процесса и аппаратное представление для различных технологических процессов широко представлены в работах [2-4], где рассмотрены различные схемы реализации получения лизина, оборудование, необходимое для этого процесса, тепловой и массовый баланс, температурные режимы и режимы ферментации. Здесь следует заметить, что производство лизина энергетически высоко затратный процесс.

Усовершенствование технологии производства лизина проводимое различными исследователями, позволило разработать математические модели, описывающие производство [4,5].

В технологическом оборудовании завода по производству лизина используются выпарные установки,

ферментаторы, сушилки, сепараторы, а также вспомогательное оборудование, обеспечивающее функционирование основного технологического процесса, энергосберегающие мероприятия и экологическую безопасность.

Пластинчатые теплообменные аппараты (ПТА) относятся к вспомогательному оборудованию технологического процесса, в том числе используются в качестве рекуперативных устройств, позволяющих экономить внешние теплоносители процесса. Использование пластинчатых подогревателей, в том числе и рекуперативных, является достаточно традиционным решением многих тепловых технологических процессов в пищевой промышленности [6].

**Цель и задачи исследования.** Главной целью настоящего исследования было обоснование целесообразности модернизации, разработка мероприятий и практическая реализация реконструкции сети рекуперативных пластинчатых подогревателей с целью уменьшения экономических потерь производства, связанных с остановкой на чистку теплообменных аппаратов.

Расчет новых теплообменных аппаратов, обеспечивающих заданные условия эксплуатации с более высоким сопротивлением к загрязнению теплообменной поверхности.

Проведение лабораторных и натурных испытаний запроектированных теплообменных аппаратов и внедрение их в производственный процесс.

**Формулировка проблемы и ее техническое решение.** В технологическом процессе производства лизина были запроектированы и установлены три рекуперативных пластинчатых теплообменника охлаждения и нагрева глюкозы, производства «Альфа Лаваль» марки T20-BFG с титановыми пластинами толщиной 0,6 мм. Тип пластин в аппаратах – МН/МЛ. Рекуперативные теплообменники являются вспомогательным оборудованием в общей технологической схеме получения лизина, однако их роль существенна для реализации процессов эффективного нагрева и охлаждения сырья.

Исходные данные и расчетные характеристики приведены в табл. 1. Первый и второй рекуперативные теплообменники подогрева глюкозы 40 %, глюкозой 40 %, имеет тепловую нагрузку 1562 КВт. Третий теплообменник подогрева 75 % глюкоза таким же по концентрации раствором глюкозы имеет нагрузку 1697 КВт.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчетов теплообменников

Тепло-носитель	Температура по горячей стороне, °С		Температура по холодной стороне, °С		Запас, %	Площадь теплообмена, м <sup>2</sup>	Потери давления по сторонам, КПа		Касательное напряжение на стенке по сторонам, Па	
	Вход	Выход	Вход	Выход			Горячая	Холодная	Горячая	Холодная
Глюкоза 40 %	140	35	15	120	85	163,8	1,1	1,3	0,7	0,8
Глюкоза 75 %	140	70	50	120	31	261,0	11,6	21,0	8,0	13,1

Глюкоза моносахарид, который по своим химическим свойствам отличается от раствора сахарозы. При нагревании глюкоза претерпевает химические

изменения. В зависимости от степени теплового воздействия и от концентрации растворов глюкозы могут образовываться различные продукты разложения: ан-

гидриды глюкозы (с отщеплением одной из двух молекул воды), продукты конденсации (реверсии), оксиметилфурфурол, окрашенные продукты изменения – гуминовые вещества и кислые продукты разложения – муравьиная и левулиновая кислоты.

По своим тепловым характеристикам, таким как теплопроводность и удельная теплоемкость глюкоза близка раствору сахара примерно равной концентрации. Вязкость насыщенных водных растворов глюкозы в отличие от водных растворов сахарозы растет с увеличением температуры. Это объясняется тем, что растворимость глюкозы с повышением температуры увеличивается быстрее, чем уменьшается вязкость ее растворов.

Будем считать, что при расчете теплообмена и гидравлических потерь давления, раствор глюкозы близок по своим физико-химическим характеристикам к чистым сахарным растворам такой же концентрации. Поэтому по аналогии с работой пластинчатых аппаратов в сахарной промышленности, проведенный анализ данных в таблице показал, что при проектировании нарушены основные принципы подбора пластинчатых теплообменников, рекомендованные при работе с сахарными растворами. Во-первых, запас поверхности в таких приложениях рекомендуется принимать не более 10 % [7], во-вторых, величина касательного напряжения на стенке желательна должна быть более 50 Па [8], в третьих, расчетное значение потерь давления по сторонам аппарата для обеспечения высокой скорости в каналах необходимо проектировать порядка 50–70 КПа [9–11].

В процессе эксплуатации установленного оборудования выяснилось, что текущие расходы и температурные режимы теплоносителей могут быть значительно ниже расчетных. Последнее обстоятельство приводит к падению скоростей теплоносителей в каналах теплообменников, что, в свою очередь, вызывает резкую интенсификацию роста отложений на теплопередающей поверхности пластин. Фактически завышение поверхности и снижение расхода приво-

дит к переходу от турбулентного режима движения теплоносителей в каналах теплообменников в режим близкий к ламинарному, что сопровождается падением коэффициента теплопередачи, ростом гидравлического сопротивления и общему снижению эффективности работы теплообменника. В результате такой работы аппаратов появилась необходимость постоянной безразборной химической промывки и частой периодической разборки и чистки аппаратов для устранения отложений, которые не удавалось устранить постоянной безразборной мойкой. Внеплановые остановки теплообменников вызывали нарушение соблюдения всего технологического процесса, неравномерность работы основного оборудования, увеличению стоимости выпускаемой продукции в целом и общим экономическим потерям в целом по предприятию.

Другим отрицательным эффектом от такой работы теплообменников является тот факт, что частая разборка и сборка аппаратов привела выходу из строя значительного количества уплотнений. Постоянная замена дорогостоящих уплотнений также приносило значительный экономический ущерб, связанный с приобретением новых комплектов уплотнений.

Наличие всех перечисленных неблагоприятных для работы факторов, таких как высокая интенсивность появления отложений на теплопередающей поверхности пластин; постоянная безразборная химическая промывка; частые разборки аппаратов для их механической очистки, приводящая к замене уплотнений, послужили основанием для проведения мероприятий по проверке не только технологического режима их работы (температурного режима рекуперации и величины потерь давления), но и к перепроектированию установленных теплообменных аппаратов.

Для улучшения работы теплообменного оборудования было проведено новое проектирование с учетом принципов расчета теплообменников для сахарной промышленности, табл. 2.

Таблица 2 – Расчетные характеристики реконструированных теплообменников

Теплоноситель	Запас, %	Площадь тепло- обмена, м <sup>2</sup>	Потери давления по сторонам, КПа		Касательное напряжение на стенке по сторонам, Па	
			Горячая	Холодная	Горячая	Холодная
Глюкоза 40 %	68	90,0	5,0	5,7	3,3	3,6
Глюкоза 40 %	65	81,0	6,1	7,0	3,9	4,3
Глюкоза 75 %	56	99,0	24,0	58,0	19,3	38,0

Для обеспечения высокой скорости в каналах аппаратов было сокращено количество пластин и тип пластин МН/МЛ был заменен на тип Н/Н. Кроме того, на первых двух позициях было принято решение оставить титановые пластины, а на позиции нагрева охлаждения глюкозы 40 % концентрации заменить титановые пластины на пластины из нержавеющей стали марки AISI 316 с толщиной пластины 0,7 мм. Такая замена позволяет существенным образом экономить средства на приобретение пластинчатого теп-

лообменника, так как стоимость пластин из нержавеющей стали AISI 316 (даже большей толщины) существенно ниже стоимости пластин из титана.

**Выводы и заключение.** Анализ полученных результатов (табл. 2), позволил сделать вывод о том, что проведенное проектирование новых теплообменных аппаратов, было направленно на снижение поверхности теплообмена (уменьшение числа каналов) теплообменников. Это, прежде всего, позволило увеличить скорость теплоносителей и уйти от течения жидкости

в каналах близкого к ламинарному к турбулентному течению. Последнее обстоятельство дало эффект увеличения интенсивности теплообмена и главное позволило резко увеличить значение касательного напряжения на теплопередающей поверхности пластин, что в свою очередь, снизило интенсивность появления отложений на теплопередающей поверхности пластин.

Также для обеспечения качественной работы с очисткой поверхности были модернизирована установка безразборной химической промывки (CIP-мойка). Для этого ее производительность (расход) 15 м<sup>3</sup>/ч была увеличена до 40 м<sup>3</sup>/ч. Увеличение мощности промывки дало немедленный положительный эффект за счет высокой турбулентности течения моющего раствора. Это позволило сделать вывод о том, что для таких продуктов необходимо рассчитывать производительность работы установки CIP-мойки в 2–2,5 раза больше, чем фактическая по самому продукту, так как фактически моющий раствор по консистенции это вода, которая дает при промывке более низкое значение касательного напряжения на стенке пластины. Для обеспечения качественного проектирования можно рекомендовать проведения дополнительного поверочного расчета теплообменника, взяв в качестве теплоносителей воду по горячей и холодной стороне. При расчете необходимо обеспечить такой расход теплоносителей, чтобы значение касательного напряжения на стенках теплопередающих пластин составляло не менее 25 Па.

Работа реконструированных теплообменных аппаратов в новых условиях показала следующее. Установленные аппараты отработали более месяца без останова и разборки на чистку. Количество CIP-моек сократилось вдвое и при этом улучшилось качество промывок. Пластины из нержавеющей стали хорошо зарекомендовали себя в работе.

#### Список литературы

1. Pfefferle W. Biotechnological manufacture of lysine / W. Pfefferle, B. Moeckel, B. Bathe, A. Marx // Advanced Biochemical Engineering Biotechnology, 2003. 79. P. 59–112.
2. Heinzle E. Development of Sustainable Bioprocesses: Modeling and Assessment / E. Heinzle, A. P. Bwiler, C. L. Cooney // Wiley, 2007. 316 p.
3. Anastassiadis S. L-lysine fermentation / S. Anastassiadis // Recent Patent Biotechnology, 2007. Vol. 1. N 1. P.1–24.
4. Hall C. J. Lysine: biosynthesis, catabolism and roles / C. J. Hall, C. Soares da Costa // WikiJournal of Science, 2018. 1 (1): 4. doi:10.15347/wjs/2018.004. ISSN 2470-6345.
5. Buchs J. Precise optimization of fermentation processes through integration of bioreaction / J. Buchs // Process computations in biotechnology. McGraw-Hill, New Delhi, 1994. P. 194–237.
6. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении / Л. Л. Товажнянский, П. А. Капустенко, Г. Л. Хавин, О. П. Арсеньева // Под ред Г. Л. Хавина. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 448 с.
7. Hesselgraves J. E. Compact Heat Exchangers / J.E. Hesselgraves // Butterworth-Heinemann, 2016. 502 p.
8. Alfa Laval Guide to the choice heat exchangers for the sugar industry. / Alfa Laval // [https:// www.alfalaval.in/industries / food... /sugar-production](https://www.alfalaval.in/industries/food.../sugar-production).
9. Арсеньева О. П. Оптимизация пластинчатого теплообменника / О. П. Арсеньева, А. В. Демирский, Г. Л. Хавин // Пробл. машиностроения. 2011. Т. 14, № 1. С.23–31.
10. Модернизация системы последовательно установленных подогревателей сахарного сока / О. П. Арсеньева, Т. Г. Бабак, А. В. Демирский, Г. Л. Хавин // Наукові праці ОНАХТ. Одеса: 2011. Вип. 39. Т. 2. С. 151–155.
11. Практическая реконструкция системы подогревателей сахарного сока перед выпариванием / Л. Л. Товажнянский, О. П. Арсеньева, А. В. Демирский, Г. Л. Хавин // Інтегровані технології та енергозбереження. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 2. С. 99–103.

#### References (transliterated)

1. Pfefferle W. Biotechnological manufacture of lysine / W. Pfefferle, B. Moeckel, B. Bathe, A. Marx // Advanced Biochemical Engineering Biotechnology, 2003. 79. P. 59–112.
2. Heinzle E. Development of Sustainable Bioprocesses: Modeling and Assessment / E. Heinzle, A. P. Bwiler, C. L. Cooney // Wiley, 2007. 316 p.
3. Anastassiadis S. L-lysine fermentation / S. Anastassiadis // Recent Patent Biotechnology, 2007. Vol. 1. N 1. P.1–24.
4. Hall C. J. Lysine: biosynthesis, catabolism and roles / C. J. Hall, C. Soares da Costa // WikiJournal of Science, 2018. 1 (1): 4. doi:10.15347/wjs/2018.004. ISSN 2470-6345.
5. Buchs J. Precise optimization of fermentation processes through integration of bioreaction / J. Buchs // Process computations in biotechnology. McGraw-Hill, New Delhi, 1994. P. 194–237.
6. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении / Л. Л. Товажнянский, П. А. Капустенко, Г. Л. Хавин, О. П. Арсенева // Под ред Г. Л. Хавина. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 448 с.
7. Hesselgraves J.E. Compact Heat Exchangers / J.E. Hesselgraves // Butterworth-Heinemann, 2016. – 502 p.
8. Alfa Laval Guide to the choice heat exchangers for the sugar industry. / Alfa Laval // [https:// www.alfalaval.in/industries / food... /sugar-production](https://www.alfalaval.in/industries/food.../sugar-production).
9. Arsenyeva O. P. Optimizatsiya plastinchatogo teploobmennika / O. P. Arsenyeva, A. V. Demirskiy, G. L. Havin // Probl. mashinostroeniya. 2011. T.14, #1. S.23–31.
10. Modernizatsiya sistemyi posledovatelno ustanovlennyih podogrevateley saharnogo soka / O. P. Arsenyeva, T. G. Babak, A. V. Demirskiy, G. L. Havin // NaukovI pratsI ONAHT. Odesa: 2011. Vip. 39. T. 2. S. 151–155.
11. Prakticheskaya rekonstruktsiya sistemyi podogrevateley saharnogo soka pered vyiparivaniem / L. L. Tovazhnyanskiy, O. P. Arsenyeva, A. V. Demirskiy, G.L. Havin // Integrovani tehnologIYi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «HPi», 2012. # 2. S. 99–103.

Надійшло (received) 13.10.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Демірський Олексій Вячеславович (Демирский Алексей Вячеславович, Alexey Demirskyy)** – інженер кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7357-998X>; e-mail: alexey.demirskyy@gmail.com.